

袭港热带气旋持续时间长期频率分析*

陶山山, 宋佳玲, 廖振焜, 董胜**

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 香港经常受到西北太平洋热带气旋的影响,对该地区热带气旋持续时间的研究有助于经济社会的稳定发展。按照气象和天文台警告信号,热带气旋分为不同的强度等级。建立热带气旋持续时间的 Poisson-Weibull 复合分布模型,相应获得持续时间重现值的求解公式,分别用于不同热带气旋分类下持续时间多年一遇重现值的计算中。基于 1987—2016 年袭港热带气旋数据的分析结果表明,Poisson-Weibull 分布适用于不同的持续时间分类样本;强的热带气旋经常会伴随较长的持续时间,这将会对该地区造成更为严重的破坏,这可为防灾减灾提供参考。

关键词: 热带气旋; 香港; 持续时间; 复合极值分布; 重现值

中图分类号: P732.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)02-135-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170298

引用格式: 陶山山, 宋佳玲, 廖振焜, 等. 袭港热带气旋持续时间长期频率分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 135-141.

TAO Shan-Shan, SONG Jia-Ling, LIAO Zhen-Kun, et al. Long-term frequency analysis for the durations of tropical cyclones attacking Hong Kong[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(2): 135-141.

香港的地理位置决定了它经常受到西北太平洋热带气旋特别是台风的影响。香港是国际化大都市,经济发达、人口密集、港口物流非常发达,台风引发的破坏极为严重。香港天文台对袭港热带气旋进行了长期的观测,获得了大量气象和水文资料^[1]。热带气旋经过某地区花费的时间越久,其对该地区的影响相对越大,因此有必要对袭港热带气旋的持续时间进行长期频率分析。本文对持续时间的定义为热带气旋在香港地区的逗留时间。

不同行业对事件历时的研究由来已久。公路交通事件的持续时间可选用对数正态分布、双对数分布或 Weibull 分布进行描述^[2]。在干旱频率分析中,干旱历时期常选用对数正态分布、Weibull 分布和指数分布等进行拟合^[3-4]。对于海洋环境要素,海浪或风速超过某阈值的平均持续时间服从 Gamma 分布或二参数 Weibull 分布^[5]。

通过频率分析,可得到热带气旋持续时间的重现值,即从长期概率意义上,该重现值对应的持续时间在一定年限内平均发生一次。研究热带气旋持续时间的重现值时,需要考虑每年袭港热带气旋的频数。基于随机点过程模型,学者提出了复合极值分布理论,并用

于推算台风波浪多年一遇设计波高、多年一遇设计风速^[6-7]。常用的复合极值分布假设事件发生频次服从 Poisson 分布或二项分布,事件对应的极值服从 Gumbel 分布、Weibull 分布或对数正态分布等,从而得到相应的 Poisson-Gumbel 复合极值分布等^[8-9]。

本文基于 1987—2016 年袭港热带气旋的持续时间序列,根据不同的气象和警告信号等级,利用复合极值分布,对持续时间进行长期重现值概率分析。

1 袭港热带气旋持续时间

1.1 热带气旋分类

从气象角度,接近风暴中心 10 min 最高平均风速,热带气旋可分为热带低气压(62 km/h 及以下)、热带风暴(63~87 km/h)、强热带风暴(88~117 km/h)、台风(118~149 km/h)、强台风(150~184 km/h)和超强台风(185 km/h 及以上)^[10]。

袭港热带气旋一般在 5—11 月出现,其中 9 月份最为密集。如有热带气旋在香港 800 km 出现,香港天文台会根据其影响本地区的严重程度,发出不同的警告信号^[1](见表 1)。这类警告信号可为市民出行及危害防范提供参考^[11]。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51509227;51779236);山东省自然科学基金项目(ZR2014EEQ030)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51509227; 51779236); the Shandong Province Natural Science Foundation, China (ZR2014EEQ030)

收稿日期:2018-08-13; 修订日期:2018-12-02

作者简介:陶山山(1985-),男,博士,讲师,研究方向为海洋工程环境及其与结构物的相互作用。E-mail: taoshanyilu@126.com

** 通讯作者: E-mail: dongsh@ouc.edu.cn

气象上强的热带气旋不必然对应更高的警告信号。如2013年的超强台风“天兔”，其引起的最高信号等级为8级，而2012年稍弱的强台风“韦森特”则引发了10级的警告信号。

1.2 热带气旋持续时间

对某一编号的热带气旋，根据其开始和终止时间，容易计算热带气旋的持续时间。不同类型的热带气旋，其持续时间的长短对强度影响很大，如相同持续时间的强台风会比热带低压带来更大的破坏。因此，需要对持续时间按照热带低气压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风进行分类讨论。

某一热带气旋过境香港时，天文台会根据其对本

地区影响程度的大小，将该气旋的持续期按照不同的警告信号进行划分。如2012年强台风“韦森特”，其被划分为8个警告信号阶段，分别为1号(7/21, 15:40-7/23, 5:20)、3号(7/23, 5:20-7/23, 17:40)、8号东北(7/23, 17:40-7/23, 23:20)、9号(7/23, 23:20-7/24, 00:45)、10号(7/24, 00:45-7/24, 3:35)、8号东南(7/24, 3:35-7/24, 10:10)、3号(7/24, 10:10-7/24, 14:40)、1号(7/24, 14:40-7/24, 23:15)。因此，同一热带气旋的持续期被划分为不同的警告信号持续时间，也需要对不同等级的警告信号持续时间分类讨论。

对于不同类别的持续时间，需研究其多年一遇重现值，其结果可为台风防灾减灾提供参考。

表1 香港热带气旋警告信号

Table 1 Warning signals of tropical cyclones attacking Hong Kong

信号等级 Grade	含义 Explanation
1	有一热带气旋集结于香港约800 km范围内,可能影响本港。
3	香港近海平面处现正或预料普遍吹强风,持续风力41~62 km/h,阵风可能超过110 km/h,且风势可能持续。
8	香港近海平面处现正或预料普遍受烈风或暴风从信号所示方向(西北、西南、东北或东南)吹袭,持续风力63~117 km/h,阵风可能超过180 km/h,且风势可能持续。
9	烈风或暴风的风力现正或预料会显著加强。
10	风力现正或预料会达到台风程度,持续风力达118 km/h或以上,阵风更可能超过220 km/h。

2 热带气旋持续时间的概率分布

2.1 持续时间的概率分布

若已知某类热带气旋在若干年内的持续时间序列为 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M$ ，其独立同分布于随机变量 X 。可选用合适的概率分布 $G(x)$ 对该序列进行拟合，分布中各参数的估计方法有矩法、极大似然法和适线法等^[12]。根据以往对持续时间的研究，这里选用二参数Weibull分布和极大似然法求解。

二参数Weibull分布的概率分布函数为：

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \exp[-(x/a)^b], & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 a 和 b 分别为形状参数和尺度参数。

2.2 持续时间的复合极值分布

重现值的计算一般采用年极值法。热带气旋每年发生频次不一，其持续时间每年会有多次记录，每年仅取一个极值对于数据极为浪费。这里采用复合极值分布理论对持续时间的年最大值进行描述，具体如下。

若某类热带气旋每年发生的次数为 N ，且 N 服从某一离散型分布，假设：

$$P(N=k) = p_k, \quad k=0,1,2,\dots \quad (2)$$

设该年热带气旋持续时间序列为 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ ，

独立同分布于 $G(x)$ ，且与变量 N 独立，令：

$$X = \begin{cases} 0, & N=0 \\ \max\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N\}, & N \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $N=0$ 表示没有热带气旋经过； $N \geq 1$ 表示至少有一场热带气旋影响香港。因此， X 表示该类热带气旋持续时间的年极值。根据复合极值分布理论，其分布函数 $F(x)$ 可近似表示为：

$$F(x) \approx F_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \{ [G(x)]^k \cdot P(N=k) \} \quad (4)$$

一般称 $F_0(x)$ 为复合极值分布。若 N 服从参数为 λ 的Poisson分布，即：

$$P(N=k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}, \quad k=0,1,2,\dots \quad (5)$$

则

$$F_0(x) = e^{-\lambda[1-G(x)]} \quad (6)$$

2.3 持续时间的重现值

假设持续时间的重现期 $T=1/p$ ，且 $1-F_0(x_p)=p$ ，于是根据式(6)， X 的上侧分位值 x_p 可表示为

$$x_p = G^{-1} \left(1 + \frac{\ln(1-1/T)}{\lambda} \right) \quad (7)$$

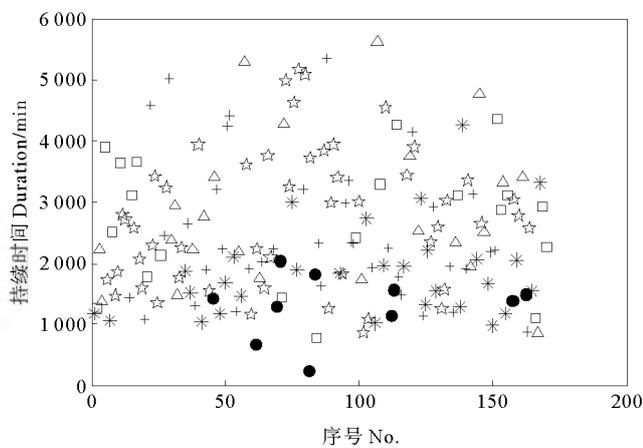
式中 $G^{-1}(\cdot)$ 为分布函数 $G(\cdot)$ 的反函数。该 x_p 为

热带气旋持续时间的 T 年一遇重现值。

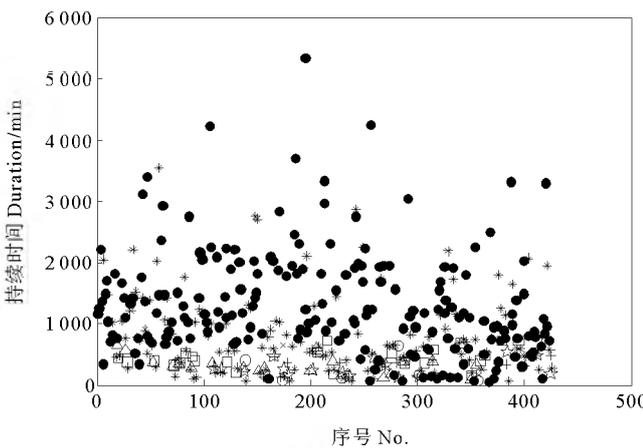
若分布 $G(x)$ 的未知参数为 θ , 可通过持续时间序列 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M$, 利用极大似然法进行参数估计; 而 Poisson 分布的参数 λ 可取每年发生频数的均值。

3 袭港热带气旋持续时间重现概率分析

根据香港天文台 1987—2016 年的袭港热带气旋记录资料, 按照气象和警告信号分类, 分别获得两组热带气旋持续时间序列(见图 1)。由于发出警告信号时, 将各热带气旋按照严重程度分段, 故警告信号对应的热带气旋数(427 个)远大于气象角度给出的热带气旋个数(170 个)。



a. 气象分类 (170 个, ●热带低气压; *热带风暴; +强热带风暴; ★台风; △强台风; □超强台风)
 Meteorological category (170, ●tropical depression; *tropical storm; +severe tropical storm; ★typhoon; △severe typhoon; □super storm)



b. 警告信号分类 (427 个, ●1号; +3号; +8号西北; ★8号西南; △8号东北; □8号东南; ○9号; ×10号)
 Warning signal category (427, ●signal 1; +signal 3; +signal 8 northwest; ★signal 8 southwest; △signal 8 northeast; □signal 8 southeast; ○signal 9; ×signal 10)

图 1 袭港热带气旋持续时间散点图(1987—2016 年)

Fig.1 Scatter plots of tropical cyclones' duration which attacked Hong Kong (1987—2016)

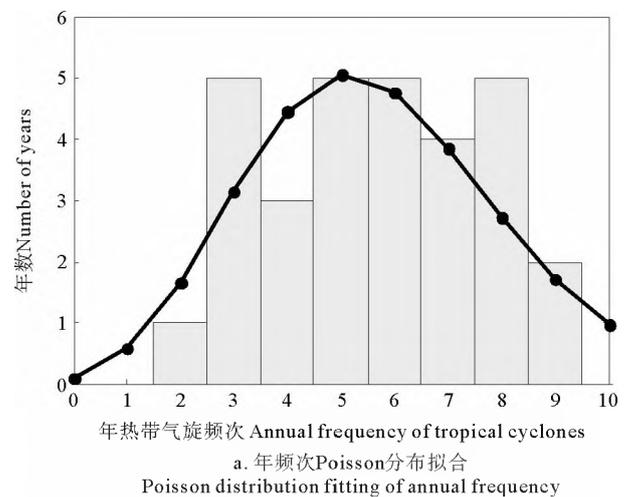
基于 Poisson-Weibull 复合极值分布, 分 3 种情形

对持续时间重现值进行计算:(1)所有气象角度热带气旋;(2)不同气象分类热带气旋;(3)不同警告信号等级热带气旋。

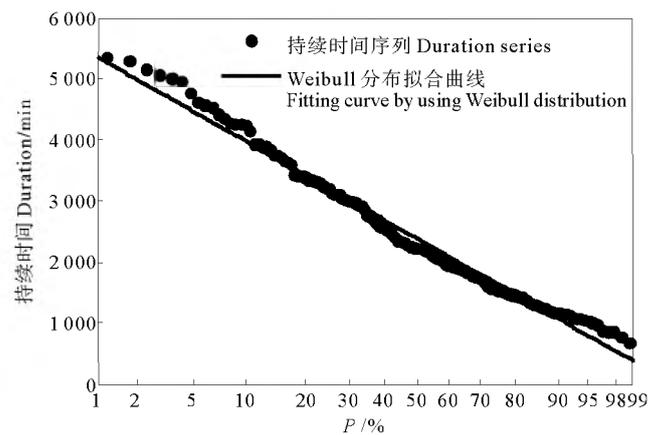
3.1 所有气象角度热带气旋

采用 Poisson 分布对 1987—2016 每年的所有热带气旋发生次数进行拟合(见图 2a), 参数 λ 的估计值为 5.67; 同时采用 Weibull 分布拟合热带气旋持续时间序列(见图 2b), 参数 a 和 b 的估计值分别为 2 781.46 和 2.34。结果表明, Poisson-Weibull 复合极值分布对该序列拟合良好。

在置信度 $\alpha = 0.05$ 条件下, Weibull 分布拟合的 K-S 统计量为 $D_n = 0.077 6$, 小于检验值 $D_n(\alpha) = 0.103 1$, 通过了 K-S 检验。根据式(1)和式(7), 可求得相应的重现值(见表 2)。



a. 年频次 Poisson 分布拟合
 Poisson distribution fitting of annual frequency



b. 持续时间序列 Weibull 分布拟合
 Weibull distribution fitting of duration series

图 2 袭港热带气旋持续时间 Poisson-Weibull 分布拟合(所有 170 个热带气旋)

Fig.2 Poisson-Weibull distribution fitting of tropical cyclones' duration which attacked Hong Kong (all 170 tropical cyclones)

3.2 不同气象分类热带气旋

由于热带低气压只有潜在影响, 而台风强度远大

于热带风暴,故将热带气旋持续时间分为两组分析:
 (1)热带风暴 & 强热带风暴;(2)台风 & 强台风 & 超强台风。

与3.1节类似,利用Poisson-Weibull复合极值分布对这两组序列进行拟合。

(1)热带风暴 & 强热带风暴的持续时间序列

Poisson分布中参数 λ 的估计值为2.23;Weibull分布参数 a 和 b 的估计值分别为2512.35和2.29。结果表明,Poisson-Weibull复合极值分布对该序列拟合良好(见图3)。在置信度 $\alpha=0.05$ 条件下,Weibull分布拟合的K-S统计量为 $D_n=0.1439$,小于检验值 $D_n(\alpha)=0.1632$,通过K-S检验。根据式(1)和式(7),可求得相应的重现值(见表2)。

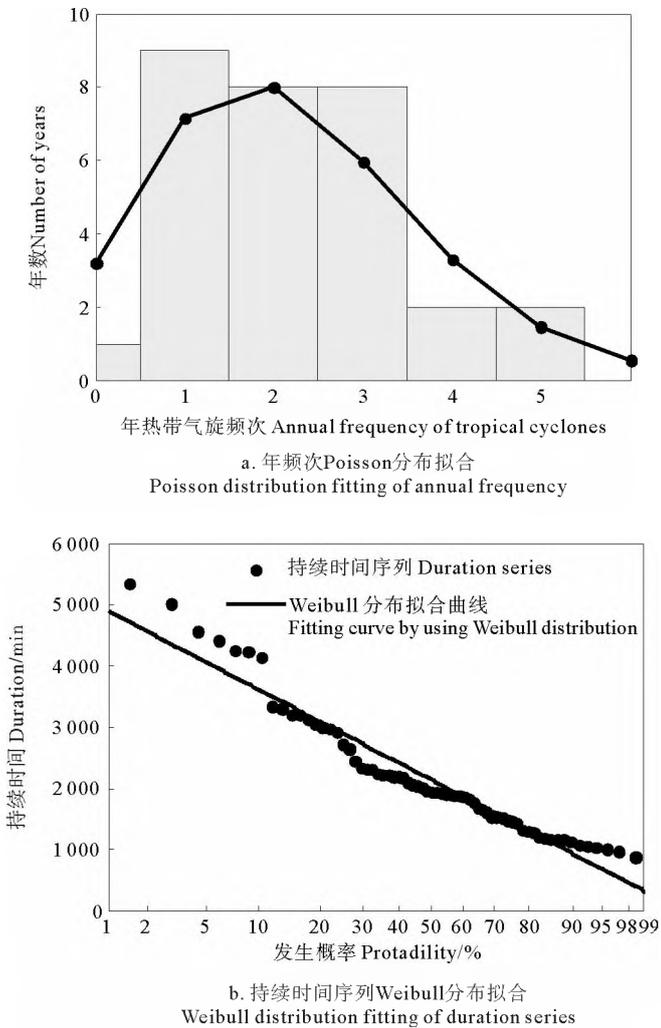


图3 袭港热带气旋持续时间 Poisson-Weibull 分布拟合(热带风暴 & 强热带风暴)

Fig.3 Poisson-Weibull distribution fitting of tropical cyclones' duration which attacked Hong Kong (tropical storms & severe tropical storms)

(2)台风 & 强台风 & 超强台风的持续时间序列

Poisson分布中参数 λ 的估计值为3.10;Weibull分布参数 a 和 b 的估计值分别为3103.38和2.66。结果表明,Poisson-Weibull复合极值分布对该序列拟合良好(见图4)。在置信度 $\alpha=0.05$ 条件下,Weibull分布拟合的K-S统计量为 $D_n=0.0462$,小于检验值 $D_n(\alpha)=0.1389$,通过K-S检验。根据式(1)和式(7),可求得相应的重现值(见表2)。

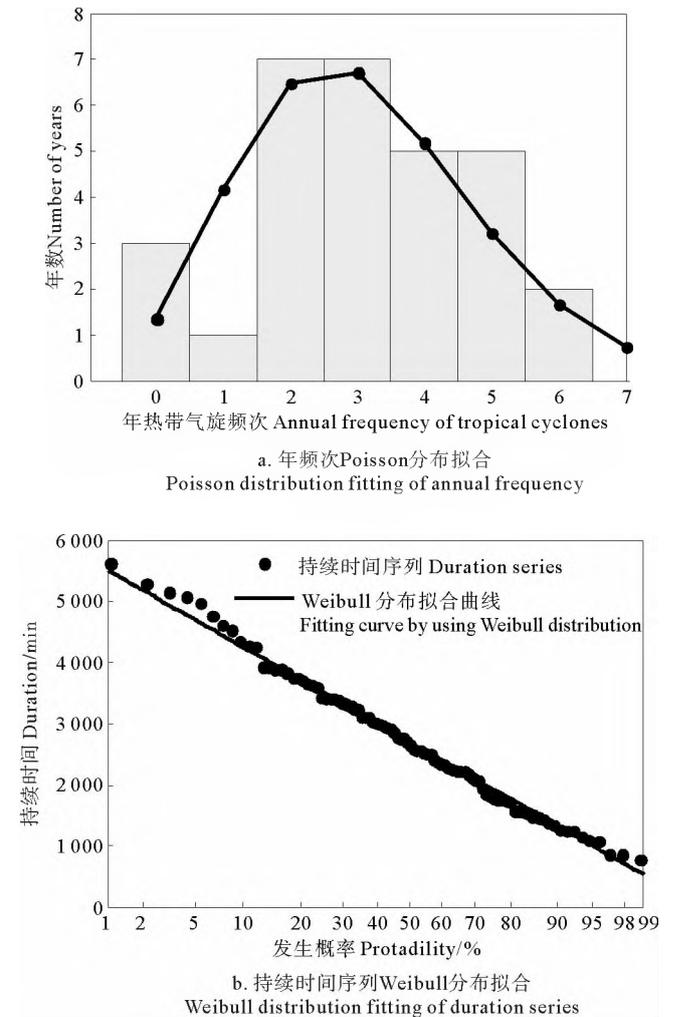


图4 袭港热带气旋持续时间 Poisson-Weibull 分布拟合(台风 & 强台风 & 超强台风)

Fig.4 Poisson-Weibull distribution fitting of tropical cyclones' duration which attacked Hong Kong (typhoons & severe typhoons & super typhoons)

3.3 不同警告信号等级热带气旋

由于警告信号8号等级以上会对香港地区产生较大影响,故而分别对8号西北、8号西南、8号东北、8号东南及9、10号的热带气旋持续时间序列进行分析。

Poisson-Weibull分布的拟合结果见表3,它们均通过了K-S检验。拟合图像与图2~4类似,所求重现值见表2。

以上结果表明,Poisson-Weibull复合极值分布适

用于各种分类的袭港热带气旋持续时间序列。通过比较可以发现,所有热带气旋持续时间计算所得各重现值较其他分类为大,这是由热带低气压历时较久所致。另外,“台风 & 强台风 & 超强台风”组合计算得到的持续时间重现值比“热带风暴 & 强热带风暴”组合的值要大。这需要引起气象部门的注意,因为强度高且持续时间久的台风会引起更大的破坏。对于警告信号为 8

号的热带气旋,东南、西北方向持续时间的重现值较东北、西南两方向要大,这一结果可为防灾减灾提供依据。在重现期低于 100 年时,警告信号为“9、10 号”的热带气旋,其持续时间重现值要较 8 号为小,这符合一般规律;重现期高于 100 年时,重现值会略大,这说明超强台风或会相伴更长的持续时间,导致的破坏会更严重,这也需要引起相关部门的警惕。

表 2 热带气旋持续时间重现值
Table 2 Return values of tropical cyclones' duration

重现期 Return period/a	5	10	20	50	100	200	500	750	1 000
所有气象气旋 All meteorological cyclones	4 597	5 026	5 396	5 830	6 129	6 408	6 754	6 899	7 000
热带风暴 & 强热带风暴 Tropical cyclones & severe tropical cyclones	3 618	4 092	4 488	4 943	5 251	5 536	5 886	6 032	6 133
台风 & 强台风 & 超强台风 Typhoons & severe typhoons & super typhoons	4 464	4 906	5 275	5 697	5 982	6 245	6 567	6 701	6 793
警告信号 8 号西北 Warning signal 8, northwest	516	575	625	682	720	756	799	817	830
警告信号 8 号西南 Warning signal 8, southwest	297	387	453	523	567	608	656	676	690
警告信号 8 号东北 Warning signal 8, northeast	392	484	553	626	674	717	769	790	805
警告信号 8 号东南 Warning signal 8, southeast	536	627	694	765	810	851	899	919	932
警告信号 9 号 & 10 号 Warning signal 9 and 10	129	324	475	646	763	874	1 013	1 072	1 113

表 3 热带气旋持续时间 Poisson-Weibull 分布拟合检验
Table 3 Fitting tests of tropical cyclones' duration based on Poisson-Weibull distributions

数据序列 Data series	Poisson 分布拟合 Fiting by Poisson distribution		Weibull 分布拟合 Fitting by Weibull distribution			
	λ		a	b	D_n	$D_n(\alpha)$
警告信号 8 号西北 Warning signal 8, northwest	2.50		360.82	2.47	0.165 6	0.327 3
警告信号 8 号西南 Warning signal 8, southwest	0.53		315.09	2.34	0.186 0	0.327 3
警告信号 8 号东北 Warning signal 8, northeast	0.67		377.89	2.48	0.166 2	0.294 1
警告信号 8 号东南 Warning signal 8, southeast	0.77		500.15	3.04	0.112 8	0.274 9
警告信号 9 号 & 10 号 Warning signal 9 and 10	0.30		313.81	1.38	0.272 2	0.430 0

4 结语

工程上,在防波堤的防灾和船舶停泊中,必须考虑热带气旋持续时间的影响。简单用持续时间来表示热带气旋的强度无法反映其年代际的强度变化,因此需

要研究热带气旋的重现值。

本文根据 1987—2016 年袭港热带气旋数据,按照气象和天文台警告信号两种方式,对热带气旋持续时间进行分类抽样;建立热带气旋持续时间的 Poisson-Weibull 复合极值分布模型,得到持续时间重现值的求

解公式,并用于不同热带气旋分类下持续时间的多年一遇重现值计算中。

本文结果表明,Poisson-Weibull分布适用于香港地区不同的热带气旋持续时间样本;“台风 & 强台风 & 超强台风”组合及高重现期下警告信号“9、10号”组合得到的持续时间重现值,比较弱的“热带风暴—强热带风暴”组合或警告信号8号得到的值要大,这说明强度高的热带气旋或会伴随更长的持续时间。从物理角度,强热带气旋在全生命周期上一般会延续更长时间。本研究的结论说明,强度高的热带气旋在香港逗留的时间更长,这会对香港地区海岸防灾工程提出更大的压力,有关部门和民众需更加提高警惕。

对于其他地区的热带气旋,可采用本文中的方法进行类似的研究讨论,从而给出相应的防灾建议。

参考文献:

- [1] 香港天文台. 热带气旋[EB/OL].[2017-04-02]. http://www.hko.gov.hk/informtc/tcMain_uc.htm.
Hongkong Observatory. Tropical Cyclone[EB/OL].[2017-04-02]. http://www.hko.gov.hk/informtc/tcMain_uc.htm.
- [2] 姬杨蓓蓓, 张小宁, 孙立军. 交通事件持续时间预测方法综述[J]. 公路工程, 2008, 33(3): 72-79.
Jiyang B B, Zhang X N, Sun L J. A review of the traffic incident duration prediction methods[J]. Highway Engineering, 2008, 33(3): 72-79.
- [3] Gangguli P, Reddy M J. Risk assessment of droughts in Gujarat using bivariate copulas[J]. Water Resources Management, 2012, 26(11): 3301-3327.
- [4] AbuduRauf U F, Zeephongsekul P. Copula based analysis of rainfall severity and duration: A case study[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115(1-2): 153-166.
- [5] 潘锦嫦, 翟华联. 海浪波候(风候)的统计分布及其持续时间的研究[J]. 海洋通报, 1994, 13(1): 1-14.
Pan J C, Zhai H L. Statistics distribution and persistence duration of wave climate and wind climate[J]. Marine Science Bulletin, 1994, 13(1): 1-14.
- [6] 马逢时, 刘德辅. 复合极值分布理论及应用[J]. 应用数学学报, 1979, 2(4): 366-375.
Ma F S, Liu D F. Compound extreme value distribution theory and its application[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1979, 2(4): 366-375.
- [7] Barbour A D, Novak S Y, Xia A. Compound Poisson approximation for the distribution of extremes[J]. Advances in Applied Probability, 2002, 34(1): 223-240.
- [8] 翟金金, 董胜. 海啸波高重现值的统计推算[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 40-47.
Zhai J J, Dong S. Statistical calculation of return tsunami wave height[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4): 40-47.
- [9] 王少平, 王英. 海洋工程设计波浪推算方法比较研究[J]. 船舶工程, 2012, 34(5): 92-95.
Wang S P, Wang Y. Comparison study of design wave estimating methods for offshore engineering[J]. Ship Engineering, 2012, 34(5): 92-95.
- [10] 毕鑫鑫, 陈光华, 周伟灿, 等. 西北太平洋热带气旋达到不同强度时所处位置的长期趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(1): 31-40.
Bi X X, Chen G H, Zhou W C, et al. Research in long-term tendency of tropical cyclone position reaching different intensities over the western North Pacific[J]. Climate Change Research, 2017, 13(1): 31-40.
- [11] 刘永林, 延军平. 香港热带气旋趋势判断及相关机理分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 15-21.
Liu Y L, Yan J P. The trend judgement and related mechanism of Hong Kong tropical cyclones[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 15-21.
- [12] Coles S G. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values[M]. London: Springer-Verlag, 2007.

Long-Term Frequency Analysis for the Durations of Tropical Cyclones Attacking Hong Kong

TAO Shan-Shan, SONG Jia-Ling, LIAO Zhen-Kun, DONG Sheng
(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

Abstract: Hong Kong is often attacked by the northwestern Pacific tropical cyclones, and the study on the tropical cyclones' duration should contribute to the economic and social development. According to the meteorological point of view, the tropical cyclones are divided into tropical depressions, tropical storms, severe tropical storms, typhoons, severe typhoons and super typhoons; in addition, the Hong Kong Observatory classifies the tropical cyclones which attacked Hong Kong into 5 warning signal grades: 1, 3, 8 (northwest, southwest, northeast and southeast), 9 and 10. The Poisson-Weibull compound extreme value distribution of tropical cyclones' duration is constructed, and corresponding formula of return values is derived, then they are applied in the calculation of return values of different tropical cyclones' duration. Based on the records of tropical cyclones attacked Hong Kong during 1987-2016, two consecutive samples are derived. Since one tropical cyclone in different time or at different location may have more than one warning signal, so the number of tropical cyclones corresponding to warning signal grades (427) is larger than that given by meteorological point (170). Poisson-Weibull distributions are applied to three cases to observe the return values of duration: (1) all the tropical cyclones according to the meteorological point; (2) two combinations of tropical cyclones according to the meteorological point, such as "tropical storms & severe tropical storms", "typhoons & severe typhoons & super storms"; (3) five warning signal grades of tropical cyclones attacked Hong Kong, such as "8 northwest", "8 southwest", "8 northeast", "8 southeast", "9&10". The analysis shows that, Poisson-Weibull distributions are suitable to different samples of tropical cyclones' duration. By comparison, the following results are obtainedt can provide the reference to the disaster prevention and mitigation.

(1) The duration values with the same return periods based on the sample of "typhoons & severe typhoons & super storms" are larger than those based on "tropical storms & severe tropical storms", so severe tropical cyclones accompany with longer duration, and this must cause great attention of the meteorological department.

(2) For the tropical cyclones attacked Hong Kong with 8 warning signal grade, the return values of duration in the southeast and northwest are larger than those in the northeast and southwest.

(3) When the return periods are smaller than 100, the return duration values based on the sample of "9&10" warning signals are larger than those based on "8" warning signals, but if the return periods are larger than 100, we have the opposite results. This means that super warning cyclones may accompany with longer duration, and it also needs great attention of relevant departments.

Key words: tropical cyclone; Hong Kong; duration; compound extreme value distribution; return value